دانشگاه اصفهان

دانشکده فنی مهندسی

گروه مهندسی شیمی

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی شیمی

مدل‌سازی ریاضی پخش قطرات در یک شوینده‌ی ونتوری با در نظر گرفتن اثر انتقال جرم و حرارت

استادان راهنما:

دکتر محمدرضا طلایی خوزانی

دکتر امیر رحیمی

پژوهشگر:

علی‌محمد شیری

آبان‌ماه ۱۳۹۰

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات
و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامـــه
متعلق به دانشگاه اصفهان است.

به‌نام پروردگار هستی‌بخش مهربان

سپاس خداوند جهانیان را، سپاسی از سر صدق و به بلندای ابدیت، أحدی که ما را به شرف انسانیت و عقل سرافراز کرد و با گسیل داشتن پی در پی انبیای پاکش، به ویژه خاتم ایشان حضرت محمد مصطفی (ص) که حامل معجزه‌ی جاوید و آیات بینات بود، تاج پر افتخار مسلمانی را تا أبد بر تارک ما نشانید، تا بدین وسیله از تاریکیهای جهل و گمراهی رهیده و به عرصه‌های نور و رستگاری راه یابیم، و از این طریق، سعادت در این نصیب ما گردد.

پس سلام و درود سرمدی بر سید المرسلین وخاندان پاک و پیروان حقیقی او باد، آمین!

تقدیم به:

مادرم، بخاطر تمام نگرانی‌هایشان

و

پدرم، بخاطر تمام حمایتهایشان

چکیده

در این تحقیق تأثیر پدیده‌های همزمان انتقال حرارت و جرم بر پخش قطرات در یک شوینده‌ی ونتوری بصورت آزمایشگاهی و تئوری مورد مطالعه قرار گرفت. بر اساس رویکرد اولری و با لحاظ کردن پدیده‌های انتقال حرارت و جرم بین قطرات و گاز، پخش قطرات مورد مدل‌سازی قرار گرفت. میدان سرعت جریان گاز با استفاده از مدل κ-ε استاندارد و ضریب نفوذ گردابه‌ای گاز به‌کمک سرعت و طول مشخصه‌ی آشفته محاسبه گردید. ضریب نفوذ گردابه‌ای قطرات نیز با استفاده از روش ارائه شده توسط فتحی‌کلجاهی و همکاران محاسبه شد.

معادلات مربوط به فاز ناپیوسته شامل معادلات تغییر قطر قطرات، دمای قطرات و سرعت قطرات براساس قوانین بقا استخراج و بصورت همزمان با معادلات مربوط به فاز پیوسته حل گردید.

جهت بررسی صحت نتایج حاصل از مدل ریاضی ارائه شده، مجموعه‌ای از آزمایش‌ها در یک شوینده‌ی ونتوری استوانه‌ای آزمایشگاهی با تزریق محوری مایع انجام شد. مقایسه بین نتایج مدل و داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که مدل جدید ارائه شده به خوبی قادر به پیش‌بینی پخش قطرات در دما و رطوبت بالا می‌باشد.

کلید واژه‌ها: شوینده‌ی ونتوری، مدل‌سازی، پخش قطرات، جریان آشفته، انتقال جرم و حرارت، روش حجم محدود.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه

۱-۱- کنترل آلودگی هوا ۱

۱-۲- تجهیزات تصفیه گاز ۱

۱-۳- شوینده ونتوری ۳

۱-۴- شرایط عملیاتی شوینده‌های ونتوری ٤

۱-۴- مکانیسم های جداسازی ۵

۱-۴-۱- مکانیسم برخورد ۵

۱-۴-۲- مکانیسم تماس مماسی ٦

۱-۵- ویژگی‌های شوینده ونتوری ٦

۱-۶- اهمیت مدل‌سازی ریاضی شوینده‌های ونتوری ۷

فصل دوم: مروری بر مطالعات گذشته

۲-۱- افشانه‌سازی مایع ۸

۲-۲- اندازه قطرات ۱۰

۲-۲-۱- قطر متوسط قطرات ۱۱

۲-۲-۲- توزیع اندازه‌ی قطرات ۱۳

۲-۳- مروری بر چگونگی محاسبه‌ی ضرائب موجود در معادلات انتقال ۱٦

۲-۳-۲- ضریب پخش گردابه‌ای گاز و قطرات ۱٦

عنوان **صفحه**

۲-۳-۱- ضریب نیروی پسای قطرات ۱۷

۲-۳-۳- ضرائب انتقال حرارتی و جرمی قطرات ۲۰

۲-۴- مدل‌سازی پخش قطرات در شوینده‌های ونتوری ۲۲

فصل سوم: مدل ریاضی

۳-۱- فرضیات مدل ریاضی ۲۵

۳-۲- مدل‌سازی جریان قطرات ۲۶

۳-۲-۱- قانون بقای جمعیت قطرات ۲۸

۳-۲-۲- قانون بقای جرم قطرات ۳۰

۳-۲-۳- قانون بقای اندازه حرکت قطرات در جهت z ۳۲

۳-۲-۴- قانون بقای اندازه حرکت قطرات در جهت r ۳٤

۳-۲-۵- قانون بقای انرژی قطرات ۳۵

۳-۳- مدل‌سازی جریان گازی ۳۷

۳-۳-۱- مدلسازی توزیع سرعت جریان آشفته‌ی گازی ۳۷

۳-۳-۲- قانون بقای انرژی گاز ٤۱

۳-۳-۳- قانون بقای رطوبت گاز ٤۳

۳-۴- مدلسازی جت مایع و افشانه‌سازی قطرات ٤٤

۳-۴-۱- قانون بقای جرم جت ٤۵

۳-۴-۲- قانون بقای اندازه حرکت جت ٤٦

عنوان **صفحه**

۳-۴-۳- نرخ اتلاف جرم جت ٤٧

۳-۵- توزیع اندازه ذرات ٤٨

۳-۶- نحوه‌ی محاسبه‌ی ضرائب مورد نیاز معادلات پدیده‌های انتقال ٤٩

۳-۶-۱- ضریب پخش گردابه‌ای گاز ٤٩

۳-۶-۲- ضریب پخش گردابه‌ای قطرات ٥٠

۳-۶-۳- ضریب نیروی پسای قطرات ٥٢

۳-۶-۴- ضرائب حرارتی و جرمی قطرات ٥٢

فصل چهارم: روش حل عددی

۴-۱- روش حجم محدود ٥٤

۴-۱-۱- مرحله اول: تولید شبکه‌ی محاسباتی ٥٤

۴-۱-۲- مرحله دوم: گسسته‌سازی ٥٦

۴-۱-۳- مرحله سوم: حل معادلات ٥٧

۴-۲- گسسته‌سازی معادلات حاکم بر سیستم شوینده‌های ونتوری ٥٧

۴-۲-۱- گسسته سازی معادلات انتقالی جریان گازی ٥٧

۴-۲-۳- گسسته‌سازی معادلات انتقالی قطرات ٧١

۴-۳- شرایط مرزی ٧٩

۴-۳-۱- شرایط مرزی معادلات انتقالی جریان گازی ٧٩

۴-۳-۲- شرایط مرزی معادلات انتقالی قطرات ٨١

عنوان **صفحه**

۴-۴- روش حل معادلات ۸۲

۴-۴-۱- معادلات جریان گازی و قطرات ۸۲

۴-۴-۱- معادلات جت مایع ۸۲

۴-۵- الگوریتم کد کامپیوتری ۸۳

فصل پنجم: نتایج و بحث

۵-۱- تولید شبکه‌ی محاسباتی ۸۷

۵-۲- دستگاه آزمایشگاهی و نحوه‌ی انجام آزمایش‌ها ۸۸

۵-۲-۱- شرح دستگاه ۸۸

۵-۲-۲- نحوه‌ی آماده‌سازی دستگاه ۸۹

۵-۲-۳- نحوه‌ی انجام آزمایش‌ها ۸۹

۵-۳- نتایج مدلسازی پخش قطرات ۹۱

۵-۳-۱- معیارهای همگرایی حل عددی ۹۱

۵-۳-۲- توزیع غلظت قطرات ۹۳

۵-۳-۳- بررسی پارامترهای عملیاتی مدل ۹۸

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهاد

۶-۱- نتیجه‌گیری ۱۱۰

۶-۲- پیشنهادها ۱۱۱

منابع ومؤاخذ ۱۱۲

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل۱- ۱، نمایی کلی از یک شوینده‌ی ونتوری ۴
شکل۱- ۲، مکانیسم برخورد ۶
شکل۱- ۳، مکانیسم تماس مماسی ۶

شکل ۳- ۱، یک المان استوانه‌ای از سیستم شامل سیال گازی به همراه قطرات ۲۷
شکل ۳- ۲، یک المان استوانه‌ای بر روی جت در حال افشانه‌سازی به همراه جریان‌های ورودی، خروجی و اتلافی متغیر ϕ ۴۵

شکل ۴- ۱، تقسیمات حوزه جریان و چگونگی چیدمان حجم‌های کنترل در شبکه‌ی جابجاشده ۵۵
شکل ۴- ۲، حجم کنترل کمیت مقداری برای محاسبه‌ی شکل گسسته‌ی معادلات ۵۸
شکل ۴- ۳، حجم کنترل کمیت برداری محوری برای محاسبه‌ی شکل گسسته‌ی معادلات ۵۹
شکل ۴- ۴، حجم کنترل کمیت برداری شعاعی برای محاسبه‌ی شکل گسسته معادلات.....۶۳
شکل ۴- ۵، مراحل کلی برنامه‌ی اصلی ۸۴
شکل ۴- ۶، الگوریتم SIMPLE برای حل معادلات جفت شده‌ی فشار و اندازه حرکت در جریان آشفته ۸۵
شکل ۴- ۷ ، الگوریتم حل معادلات حاکم بر پخش قطرات ۸۶

شکل ۵- ۱، آرایش سیستم آزمایشگاهی جهت اندازه‌گیری غلظت عددی قطرات در شوینده ونتوری ۹۰
شکل ۵- ۲، آرایش مورد استفاده برای نمونه‌گیری و اندازه‌گیری غلظت عددی قطرات در شوینده ونتوری ۹۱
شکل ۵- ۳، نتایج آزمایشگاهی حاصل از تاثیر افزایش سرعت گاز در دبی مایع برابر با ۲ لیتر بر دقیقه ۹۴
شکل ۵- ۴، نتایج آزمایشگاهی حاصل از تاثیر افزایش دبی مایع بر توزیع غلظت قطرات در سرعت گاز برابر ۷۵ متر بر ثانیه ۹۴
شکل ۵- ۵، توزیع غلظت قطرات در انتهای گلوگاه؛ مقایسه بین نتایج حاصل از مدل و نتایج تجربی در سرعت $Vg0 = 55\ ms$.....۹۵

عنوان **صفحه**

شکل ۵- ۶، توزیع غلظت قطرات در انتهای گلوگاه؛ مقایسه بین نتایج حاصل از مدل و نتایج تجربی در سرعت $Vg0 = 65\ ms$ ۹۶
شکل ۵- ۷، توزیع غلظت قطرات در انتهای گلوگاه؛ مقایسه بین نتایج حاصل از مدل و نتایج تجربی در سرعت $Vg0 = 75\ ms$ ۹۷
شکل ۵- ۸، نتایج حاصل از توزیع غلظت قطرات در انتهای گلوگاه برای $Vgi = 75\ ms$، $Qi = 2 litr/min$، $Tdi = 294\ K$ ، $Tgi = 600\ K$ و $Ygi = 0.007\ kg\ H2O/\ kg\ dry\ air$ ۹۹
شکل ۵- ۹، تغییرات دمای گاز در طول ونتوری برای $Vgi = 75\ m/s$، $Qi = 2\ litr/min$، $Tdi = 294\ K$، $Tgi = 600\ K$ و $Ygi = 0.007\ kg\ H2O\ kg/\ dry\ air$ ۹۹
شکل ۵- ۱۰، تغییرات رطوبت گاز در طول ونتوری برای $Vgi = 75\ m/s$ ، $Qi = 2\ litrmin$، $Tdi = 294\ K$، $Tgi = 600\ K$ و $Ygi = 0.007\ kg\ H2O/\ kg\ dry\ air$ ۱۰۰
شکل ۵- ۱۱، تغییرات دمای قطره در طول ونتوری برای $Vgi = 75\ m/s$، $Qi = 2\ litr/min$، $Tdi = 294\ K$، $Tgi = 600\ K$ و $Ygi = 0.007\ kg\ H2O/\ kg\ dry\ air$ ۱۰۰
شکل ۵- ۱۲، تغییرات قطر قطره در طول ونتوری برای $Vgi = 75\ m/s$، $Qi = 2\ litr/min$، $Tdi = 294\ K$، $Tgi = 600\ K$ و $Ygi = 0.007\ kg\ H2O/\ kg\ dry\ air$ ۱۰۱
شکل ۵- ۱۳، تأثیر تغییر دمای گاز بر قطر قطره برای $Vgi = 75\ m/s$، $Qi = 2\ litr/min$، $Tdi = 294\ K$ و $Ygi = 0.007\ kg\ H2O/\ kg\ dry\ air$ ۱۰۳
شکل ۵- ۱۴، تأثیر تغییر دمای گاز بر دمای قطره برای $Vgi = 75\ m/s$، $Qi = 2\ litr/min$، $Tdi = 294\ K$، $Ygi = 0.007\ kg\ H2O/\ kg\ dry\ air$ ۱۰۴
شکل ۵- ۱۵، تأثیر تغییر دمای گاز بر رطوبت گاز برای $Vgi = 75\ m/s$، $Qi = 2\ litr/min$، $Tdi = 294\ K$، $Ygi = 0.007\ kg\ H2O\ /kg\ dry\ air$ ۱۰۵
شکل ۵- ۱۶، تأثیر تغییر دبی مایع بر دمای قطرات برای $Vgi = 75\ m/s$، $Tgi = 500\ K$، $Tdi = 294\ K$ و $Ygi = 0.007\ kg\ H2O/\ kg\ dry\ air$ ۱۰۶
شکل ۵- ۱۷، تأثیر تغییر دبی مایع بر دمای گاز برای $Vgi = 75\ m/s$، $Tgi = 500\ K$، $Tdi = 294\ K$ و $Ygi = 0.007\ kg\ H2O/\ kg\ dry\ air$ ۱۰۷

عنوان **صفحه**

شکل ۵- ۱۸، تأثیر تغییر دبی مایع بر رطوبت گاز برای $Tdi = ،Tgi = 500\ K$ ،$Vgi = 75\ m/s$ $294\ K$ و $Ygi = 0.007\ kg\ H2O/\ kg\ dry\ air$ ۱۰۷
شکل ۵- ۱۹، تأثیر تغییر دمای اولیه مایع بر رطوبت گاز برای $Tgi = 500\ K$ ،$Vgi = 75\ m/s$، $Qi = 2\ lit/min$ و $Ygi = 0.007\ kg\ H2O/\ kg\ dry\ air$ ۱۰۸
شکل ۵- ۲۰، تأثیر تغییر دمای اولیه مایع بر قطر قطرات برای $Tgi = 500\ K$ ،$Vgi = 75\ m/s$، $Qi = 2\ lit/min$ ،$Ygi = 0.007\ kg\ H2O/\ kg\ dry\ air$ و $Ddi = 2.11E-5\ m$ ۱۰۸
شکل ۵- ۲۱، تأثیر تغییر رطوبت اولیه گاز بر قطر قطرات برای $Tgi = 328\ K$ ،$Vgi = 75\ m/s$، $Qi = 2\ lit/min$ ،$Tdi = 294\ K$ و $Ddi = 2.11E-5\ m$ ۱۰۹

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول۲- ۱، برخی از روابط ارائه شده برای تخمین قطر متوسط قطرات (Chongvisal, 1971) ۱۵
جدول۲- ۲، برخی از روابط ارائه شده جهت محاسبه‌ی ضریب نیروی پسای قطرات ۱۹

جدول ۳- ۱، ثوابت مدل $\varepsilon - \kappa$ استاندارد ۴۰
جدول ۳- ۲، ثابت‌های معادله آدلبرگ (Gonçalves et al,2003) ۴۸

نشانه‌ها و کوتاه‌نوشت‌ها

کمیت	واحد	نماد
سطح حجم کنترل	$[m^2]$	A
ضرائب شرقی، غربی، شمالی و جنوبی کمیت‌ها در معادله‌ی گسسته‌شده		AE, AW, AN, AS
سطح تصویر شده	$[m^2]$	A_{Proj}
پارامتر رابطه تنکس– لاملی (معادله‌ی (۳-۸۹))	بدون بعد	c_1
ضرائب مدل $k-\varepsilon$	بدون بعد	C_1, C_2, C_μ, C_{Dk}
ضریب نیروی دراگ در قطرات	بدون بعد	C_D
متوسط زمانی غلظت عددی قطرات	$[No./m^3]$	$\overline{C}_d, C_d$
جزء نوسانی غلظت عددی قطرات	$[No./m^3]$	$\acute{C}_d$
نرخ تولید قطرات	$[No./m^3\ s]$	$\dot{C}_d$
ظرفیت گرمایی آب	$[J/kg\ .K]$	$C_{P_{liq}}$
ظرفیت گرمایی بخار آب	$[J/kg\ .K]$	$C_{P_{vap}}$
ظرفیت گرمایی مخلوط گاز- آب	$[J/kg\ .K]$	C_{P_s}
جملات نفوذ در معادله‌ی گسسته‌ی عمومی		De, Dw, Dn, Ds
قطر متوسط حجمی قطرات	$[m]$	D_{30}
قطر متوسط حجمی- سطحی قطرات	$[m]$	D_{32}
قطر قطره	$[m]$	D_d

D_h	$[m]$	قطر هیدرولیکی کانال
D_{jet}	$[m]$	قطر جت مایع
D_m	$[m]$	قطر متوسط جرمی قطرات
D_{max}	$[m]$	بزرگترین قطر قطرات
D_{AB}	$[m^2/s]$	ضریب نفوذ بخارآب در مخلوط گاز- بخارآب
e_d	$[J/s]$	فلاکس انرژی قطرات
e_g	$[J/s]$	فلاکس انرژی گاز
e	بدون بعد	ضریب معادله‌ی آدلبرگ (معادله‌ی (۳-۷۹))
E	$[m^2/s]$	ضریب پخش گردابه‌ای
Fe, Fw, Fn, Fs		جملات جابجائی در معادله‌ی گسسته‌ی عمومی
F_{wall}	$[kg\ m/s^2]$	نیروی حاصل از تنش برشی دیواره
f_m	$[kg/m]$	تابع توزیع نرمال جرمی
f_N	$[No./m]$	تابع توزیع نرمال عددی
f_p		پارامتر نیرو در معادله‌ی آدلبرگ (معادله‌ی (۳-۷۹))
f_V	$[m^3/m]$	تابع توزیع نرمال حجمی
g	$[m/s^2]$	شتاب گرانش
G		جمله‌ی تولید ($Generation$) در معادلات k و ε (رابطه (۳-۵۱))
h	$[w/m^2\ K]$	ضریب انتقال حرارت جابجایی
H	$[m]$	نصف ارتفاع گلوگاه
I		شماره‌ی هر مقطع در جهت محور برای کمیت‌های مقداری و مؤلفه‌ی شعاعی کمیت‌های برداری

شماره‌ی هر اندازه از قطر قطرات		Id
شماره‌ی هر مکان تشکیل قطرات		IJ
تعداد تقسیمات محوری	بدون بعد	IN
شماره‌ی هر مقطع در جهت محور برای کمیت‌های برداری محوری		i
شماره‌ی هر مقطع در جهت شعاع برای کمیت‌های مقداری و مؤلفه‌ی محوری کمیت‌های برداری		J
تعداد تقسیمات شعاعی	بدون بعد	JN
شماره‌ی هر مقطع در جهت شعاع برای مؤلفه‌ی شعاعی کمیت‌های برداری		j
انرژی آشفتگی	$[J/kg]$	k
ضرائب معادله‌ی آدلبرگ (معادلات (۳-۷۹) و (۳-۸۱))	بدون بعد	K_A, K_P
ضریب انتقال جرم	$[kmol\ /\ m^2\ s]$	K_Y
طول اختلاط پراندل	$[m]$	l
نسبت دبی مایع تزریقی به دبی گاز ورودی	$[m^3/1000\ \mathrm{m}^3]$	L/G
طول نفوذ جت	$[m]$	l_{JP}
دبی جرمی	$[kg/s]$	m
نرخ اتلاف جرم جت	$[kg/m\ \ s\ ]$	$\dot{m}$
جرم قطره	$[kg]$	m_d
دبی جرمی قطرات	$[kg/s]$	m_{ld}
نرخ تولید مایع به صورت قطره در واحد حجم المان	$[kg/m^3\ s]$	M_d
بردار عمود بر سطح انتگرال‌گیری		$\vec{n}$
دبی جرمی قطرات در واحد سطح	$[kg/m^2\ s]$	n_d

فلاکس جرمی رطوبت	$[kg/m^2\ s]$	n_Y
پارامتر توزیع تابع روزین- راملر	بدون بعد	n_{RR}
فلاکس انتقال جرم	$[kmol\ /\ m^2\ s]$	N_A
فلاکس عددی قطرات	$[No./\ m^2\ s]$	NM
تعداد قطرهای متفاوت قطرات	بدون بعد	N_d
تعداد مکان‌های تشکیل قطرات	بدون بعد	N_J
تعداد نازل‌های تزریق جت مایع	$[m]$	N_{or}
متوسط زمانی فشار	Pa	$p; \bar{p}$
عدد پکلت گاز در شوینده‌ی ونتوری	بدون بعد	Pe
دبی حجمی	$[m^3/s]$	Q
محور عمودی مختصات؛ شعاع	$[m]$	r
شعاع گلوگاه شوینده‌ی ونتوری	$[m]$	R_0
عدد رینولدز	بدون بعد	Re
چشمه‌ی معادله‌ی انتقال عمومی		S
طول نفوذ جت قبل از شروع اتمیزاسیون	$[m]$	S_0
زمان	$[s]$	t
دمای متوسط قطره	$[K]$	$T_d; \bar{T}_d$
دمای نوسانی قطرات	$[K]$	$\acute{T}_d$
دمای متوسط گاز	$[K]$	$T_g; \bar{T}_g$
دمای نوسانی گاز	$[K]$	$\acute{T}_g$
دمای آب	$[K]$	T_{water}

دمای مرجع	$[K]$	T_0
سرعت جریان گاز در ورودی به شوینده‌ی ونتوری	$[m/s]$	u_m
سرعت اصطکاکی در جهت محور	$[m/s]$	u_τ
مؤلفه‌ی محوری و شعاعی سرعت نوسانی قطرات	$[m/s]$	u', v'
مولفه‌ی محوری و شعاعی سرعت متوسط جریان گاز	$[m/s]$	$u, v; \bar{u}, \bar{v}$
مؤلفه‌ی محوری و شعاعی سرعت متوسط زمانی قطرات	$[m/s]$	$\overline{u}_d, \overline{v}_d$
مؤلفه‌ی محوری و شعاعی سرعت نوسانی قطرات	$[m/s]$	$\acute{u}_d, \acute{v}_d$
بردار سرعت گاز		$\vec{v}$
بردار سرعت قطرات		$\vec{v}_d$
حجم حجم کنترل	$[m^3]$	V
متوسط سرعت متقاطع نوسانات آشفتگی قطرات	$[m/s]$	$V_d^{'}$
سرعت قطرات در محل تزریق	$[m/s]$	$V_{d,inj}$
سرعت متوسط گاز	$[m/s]$	V_g
متوسط سرعت متقاطع نوسانات آشفتگی گاز	$[m/s]$	$V_g^{'}$
سرعت گاز در گلوگاه	$[m/s]$	V_{g0}
سرعت گاز در محل تزریق	$[m/s]$	$V_{g,inj}$
سرعت جت	$[m/s]$	V_{jet}
سرعت نسبی گاز و قطره	$[m/s]$	V_r
سرعت صوت	$[m/s]$	V_{sonic}
پهنای دهانه ونتوری	$[m]$	W
عدد وبر قطره	بدون بعد	We